REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
ECOLE SUPÉRIEURE DES TECHNOLOGIES AVANCÉES D'ALGER
المدرسة العليا للتقنيات المتقدمة بالجزائر

Département du second cycle

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

DE MASTER Académique

-Filière-

GENIE DES PROCEDES

-Spécialité-

TRAITEMENT DES EAUX

-Thème-

Nanomatériaux de ZnO :

Synthèse, Caractéristiques et Applications dans le Traitement des Eaux Usées

Réalisé par : **BOUNOUR Nada El Raihene**

Soutenues publiquement le 24/06/2024 devant les membres de jury :

Mme ZEMMOURI Hassiba	**Professeur**	**ENSTA**	**Présidente**
Mme SMAIL Fatima	**MAA**	**ENSTA**	**Examinateur**
Mme CHEIKH Assira	**MCB**	**ENSTA**	**Promotrice**

Année universitaire 2023-2024

Dédicace

Aujourd'hui, alors que je termine cette étape importante de ma vie académique, je tiens à vous adresser un remerciement tout particulier, empreint d'une reconnaissance infinie envers mes parents BOUNOUR Kamel et DRICI Lilia.

Depuis le tout début de ce parcours, votre soutien inconditionnel a été ma plus grande force. Vos encouragements constants, vos sacrifices silencieux et votre amour indéfectible m'ont portée à travers les hauts et les bas de cette aventure.

Chaque succès que j'ai rencontré sur cette route est aussi le vôtre. Vos valeurs, votre exemple et votre dévouement ont façonné la personne que je suis aujourd'hui.

Votre soutien financier, moral et émotionnel a été au-delà de tout ce que je pourrais jamais espérer. Vous avez sacrifié tant de choses pour que je puisse réaliser mes rêves, et pour cela, je suis éternellement reconnaissante.

Aujourd'hui, en achevant cette étape de ma vie, je veux que vous sachiez que chaque ligne de ma mémoire, chaque citation, chaque analyse est dédiée à votre amour et à votre dévouement. Votre fierté est ma plus grande récompense, et je suis honorée de pouvoir vous appeler mes parents.

Merci, du plus profond de mon cœur, pour tout ce que vous avez fait, et pour tout ce que vous êtes.

Et bien sûr, je n'oublierai jamais mes sœurs Roufaida , Razane et DHoha , Votre soutien indéfectible, votre amour et votre encouragement constant ont été ma force tout au long de ce parcours. Vous avez été mes piliers, m'aidant à surmonter les moments de doute et à célébrer chaque petite victoire.

Merci pour votre patience, votre compréhension et votre présence.

Remerciements

Nous tenons par la présente à exprimer ma profonde gratitude envers notre encadrante Mme CHEIKH Assira, Votre vision, Votre soutien logistique et votre engagement envers l'excellence académique ont créé un environnement propice à l'apprentissage et à l'épanouissement intellectuel.

Nous tenons également à exprimer ma reconnaissance envers Les membres de jury : Mme ZEMMOURI Hassiba et pour leur précieux temps et leurs précieuses contributions lors de l'évaluation de notre travail, Leur expertise et leurs commentaires ont été inestimables.

Par ailleurs, je souhaite d'adresser mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, à l'ingénieur du laboratoire Mme NADI Souad , et à toute l'équipe qui nous avons travaillé ensemble.

Je veux aussi d'adresser mes remerciements les plus sincères à nos professeurs de l'ECOLE NATIONAL SUPÉRIEURE DES TECHNOLOGIES AVANCÉES - BAB EL OUED (Ex : ESSA), dont l'expertise, le dévouement et les conseils ont été d'une importance capitale tout au long de ce parcours académique. Votre soutien infaillible, vos encouragements constants et vos retours constructifs nous ont permis de mener à bien cette étude avec confiance et rigueur.

Ce mémoire est le fruit de mon persévérance et de mon travail acharné. J'ai surmonté les défis et les obstacles avec courage et ténacité. Chaque étape franchie, chaque problème résolu, est une victoire personnelle qui mérite d'être célébrée.
Merci à moi-même pour mon engagement sans faille, pour ne jamais avoir abandonné même lorsque les moments étaient difficiles. Ce document est une preuve tangible de mon capacité à relever des défis complexes et à atteindre mes objectifs.

Résumé

Ce mémoire présente les caractéristiques des nanomatériaux d'oxyde de zinc (ZnO) utilisés dans le traitement des eaux usées, leurs techniques de synthèse et de caractérisation et leurs applications particulières. Les nanomatériaux de ZnO ont la particularité de décomposer les contaminants organiques, de désinfecter les pathogènes et d'adsorber les métaux lourds. Les méthodes de synthèse, comme la précipitation, le sol-gel et l'hydrothermie, sont décrites en détail afin d'expliquer leur impact sur les caractéristiques des nanomatériaux. La spectroscopie, la microscopie électronique et la diffraction des rayons X permettent d'étudier la composition et les performances des nanoparticules. Enfin, des approches d'amélioration, telles que la modification de surface, le dopage avec d'autres composants et la fabrication de nanocomposites, sont envisagées afin d'augmenter l'activité photocatalytique, la stabilité et la recyclabilité des nanoparticules. Les nanomatériaux de ZnO sont des solutions innovantes et performantes pour une gestion durable des ressources en eau, permettant d'apporter des améliorations importantes au traitement des eaux usées.

Mots-clés : Nanomatériaux de ZnO , Traitement des eaux , Synthèse ,Caractérisation

ملخص

يقدم هذا التقرير خصائص المواد النانوية لأكسيد الزنك (ZnO) المستخدمة في معالجة مياه الصرف الصحي، وتقنيات تخليقها وتصنيفها وتطبيقاتها الخاصة. تتميز المواد النانوية لأكسيد الزنك بقدرتها على تحلل الملوثات العضوية، وتعقيم الممرضات، وامتصاص المعادن الثقيلة. يتم وصف طرق التخليق، مثل الترسيب، وطريقة الجل-الصلب، والطريقة الحرارية المائية بالتفصيل لشرح تأثيرها على خصائص المواد النانوية. تسمح تقنيات الطيف الضوئي، والمجهر الإلكتروني، وانعراج الأشعة السينية بدراسة تركيب وأداء الجسيمات النانوية. وأخيرًا، تُناقش أساليب التحسين مثل تعديل السطح، والتطعيم بمكونات أخرى، وتصنيع المركبات النانوية لزيادة النشاط الضوئي التحفيزي، واستقرار وإعادة تدوير الجسيمات النانوية. تعد المواد النانوية لأكسيد الزنك حلولاً مبتكرة وفعالة لإدارة مستدامة لموارد المياه، مما يسمح بإجراء تحسينات مهمة في معالجة مياه الصرف الصحي.

الكلمات المفتاحية: المواد النانوية لأكسيد الزنك، معالجة المياه، التخليق، التصنيف

Abstract

This report presents the characteristics of zinc oxide (ZnO) nanomaterials used in wastewater treatment, their synthesis and characterization techniques, and their specific applications. ZnO nanomaterials are known for their ability to degrade organic contaminants, disinfect pathogens, and adsorb heavy metals. Synthesis methods such as precipitation, sol-gel, and hydrothermal methods are detailed to explain their impact on the properties of nanomaterials. Spectroscopy, electron microscopy, and X-ray diffraction techniques are employed to study the composition and performance of nanoparticles. Furthermore, enhancement approaches such as surface modification, doping with other components, and the fabrication of nanocomposites are discussed to increase photocatalytic activity, stability, and recyclability of nanoparticles. ZnO nanomaterials are innovative and effective solutions for sustainable water resource management, facilitating significant improvements in wastewater treatment.

Keywords: Zinc oxide nanomaterials, wastewater treatment, synthesis, characterization

Table des matières

Remerciements iii

Table des matières vi

Liste des figures viii

Liste des tableaux ..... **Error! Bookmark not defined.**

Liste des abréviations ix

Introduction Générale 1

Chapitre 1 Les Nanomatériaux de ZnO

1.1 Introduction aux nanomatériaux 4

1.2 Propriétés uniques des nanomatériaux de ZnO 4

1.2.1 Propriétés physiques 5

1.2.2 Propriétés chimiques 5

1.2.3 Propriétés photocatalytiques 5

1.3 Méthodes de synthèse des nanomatériaux de ZnO 6

1.3.1 Synthèse chimique 6

1.3.2 Synthèse physique 7

1.3.3 Synthèse biologique 8

1.4 Caractérisation des nanomatériaux de ZnO 9

1.4.1 Microscopie électronique 9

1.4.2 Diffraction des rayons X 9

1.4.3 Spectroscopie 10

Chapitre 2 Applications des Nanomatériaux de ZnO dans le Traitement des Eaux Usées

2.1 Principes de base du traitement des eaux usées 12

2.1.1 Prétraitement 12

2.1.2 Traitement Primaire 12

2.1.3 Traitement Secondaire 13
2.1.4 Traitement Tertiaire 13
2.1.5 Traitement des Boues 14
2.2 Utilisation des nanomatériaux de ZnO pour la dégradation des polluants organiques ... 14
2.3 Applications dans la désinfection des eaux usées 15
2.3.1 Mécanisme de désinfection 15
2.3.2 Propriétés antibactériennes 16
2.3.3 Propriétés antivirales 17

Chapitre 3 Optimisation des Nanomatériaux de ZnO pour le Traitement des Eaux Usées

3.1 Facteurs influençant l'efficacité des nanomatériaux de ZnO 20
3.1.1 Propriétés Physico-chimiques des ZnO-NPs 20
3.1.2 Conditions Environnementales 21
3.2 Techniques d'amélioration des performances 21
3.2.1 Dopage 22
3.2.2 Modification de la Surface 22
3.2.3 Optimisation des conditions opératoires 23
3.3 Impact environnemental et durabilité 23
3.3.1 Impact Environnemental 24
3.3.2 Durabilité 24
3.4 Innovations futures et tendances de recherche 24

Bibliographie 28

Liste des figures

Figure 1-1 : Gamme de tailles des nanoparticules comparées à celles des principales structures 4

Figure 1-2 Schéma récapitulatif de synthèse de nanoparticules métalliques 6

Figure 1-3 Mécanisme de formation des nanoparticules métallique dans un extrait de plantes 8

Figure 2-1 Principe de photocatalyse hétérogène de ZnO 16

Figure 2-2 Modèle cellulaire pour le mécanisme principal de l'action bactéricide des NP de ZnO. 17

Liste des abréviations

ZnO : Dioxyde zinc

NM : Nanomatériaux

MEB : Microscopie électronique à balayage

MET : Microscopie électronique en transmission

DRX : Diffraction des rayons X

FITR : Spectroscopie infrarouge transformée de Fourier

UV : Ultraviolet

PL : photoluminescence

SBR : Reacteur biologique séquentiel

Zn-NPs : Les nanoparticules de ZnO

ADN : acide désoxyribonucléique

ARN : acide ribonucléique

Zn^{2+}: ion de zinc

Ag : Argent

Cu : Cuivre

Au : Or

Fe : Fer

Introduction Générale

Dans un contexte global de croissance démographique rapide et d'industrialisation accrue, la préservation des ressources hydriques est devenue une préoccupation majeure. Les eaux usées provenant des activités domestiques, industrielles et agricoles constituent un danger majeur pour l'environnement et la santé publique si elles ne sont pas traitées. Devant ce défi, les progrès technologiques proposent des réponses innovantes, l'utilisation des nanomatériaux apparaît comme une solution intéressante. Les nanomatériaux d'oxyde de zinc (ZnO) ont suscité une grande attention en raison de leurs propriétés uniques et de leur potentiel d'utilisation dans divers domaines, y compris le traitement des eaux usées.

La préservation des ressources hydriques est devenue une préoccupation majeure dans un contexte de croissance démographique rapide et d'industrialisation croissante. Si les eaux usées provenant d'activités domestiques, industrielles et agricoles ne sont pas traitées, elles constituent un danger majeur pour l'environnement et la santé publique. Face à ce problème, les avancées technologiques offrent des solutions novatrices, l'utilisation des nanomatériaux semble être une solution intéressante. Les nanomatériaux d'oxyde de zinc (ZnO) ont attiré beaucoup d'attention en raison de leurs caractéristiques particulières et de leur potentiel pour le traitement des eaux usées.

Le chapitre 1 de ce mémoire, « Les Nanomatériaux de ZnO : Caractéristiques, Synthèse et Caractérisation », offre un aperçu des caractéristiques physiques, chimiques et optiques des nanomatériaux de ZnO. Les méthodes de synthèse telles que la précipitation, la sol-gel et la méthode hydrothermale sont également examinées dans ce chapitre, ainsi que les techniques de caractérisation utilisées pour analyser les structures et les propriétés des nanoparticules de ZnO.

Le deuxième chapitre, "Applications des Nanomatériaux de ZnO dans le Traitement des Eaux Usées", aborde les diverses applications des nanomatériaux de ZnO dans le domaine de l'assainissement des eaux. Il sera examiné en détail comment les nanoparticules de ZnO dégradent les polluants organiques, désinfectent les agents pathogènes et absorbent les métaux lourds. Les études de cas et les expériences de terrain qui démontrent l'efficacité des nanomatériaux de ZnO dans le traitement des eaux usées sont mises en lumière dans ce chapitre.

Le chapitre 3, intitulé « Amélioration des Nanomatériaux de ZnO pour le Traitement des Eaux Usées », traite des stratégies et des innovations pour améliorer les performances des nanomatériaux de ZnO. Il s'agit notamment de modifier la surface, de doper avec d'autres éléments et de créer des nanocomposites pour accroître leur activité photocatalytique, leur stabilité et leur réutilisabilité. Ce chapitre examine aussi les enjeux actuels et les perspectives à venir de l'optimisation des nanomatériaux de ZnO.

Chapitre 1

Les nanomatériaux de ZnO

Chapitre 1

Les Nanomatériaux de ZnO

1.1 Introduction aux nanomatériaux

Les nanomatériaux (NM) offrent de nombreuses applications avancées des matériaux dans divers domaines, y compris le stockage d'énergie. Les nanomatériaux sont des matériaux dont les dimensions sont de l'ordre du nanomètre (1 nm = 10^{-9} m) , Ils ont une taille d'au moins 1 à 100 nanomètres. Ces matériaux peuvent prendre la forme de nanoparticules, de nanotubes, de nanofibres ou même de films minces. Les nanomatériaux ont une structure spécifique à l'échelle nanométrique qui leur donne des propriétés distinctes de celles de leurs homologues à l'échelle macroscopique (Begum, Karim et al. 2020).

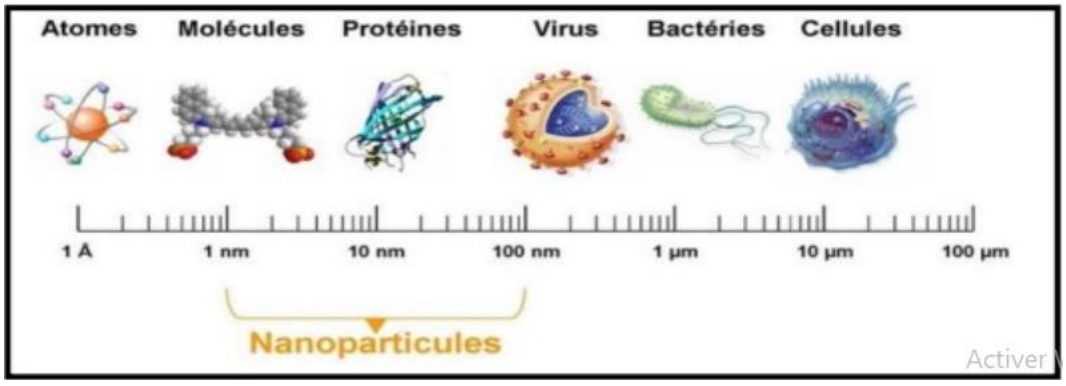


Figure 1-1 : Gamme de tailles des nanoparticules comparées à celles des principales structures

1.2 Propriétés uniques des nanomatériaux de ZnO

Les nanomatériaux de zinc (ZnO) ont des propriétés uniques qui les distinguent des autres matériaux, particulièrement à l'échelle nanométrique. La structure nanométrique, la surface spécifique élevée et les effets quantiques qui ne sont pas observés dans les matériaux à plus grande échelle sont à l'origine de ces propriétés (Muthukumar, Selvakumari et al. 2013).

1.2.1 Propriétés physiques

1.2.1.1 Haute Surface Spécifique:

La surface spécifique des nanomatériaux de ZnO est plus grande que celle de leurs homologues macroscopiques, ce qui augmente leur réactivité et leur capacité d'adsorption. Cette caractéristique est très intéressante pour des utilisations telles que la catalyse et la détection de gaz (Tomar, Abdala et al. 2020).

1.2.1.2 Effets Quantiques:

Les effets quantiques deviennent significatifs à l'échelle nanométrique, modifiant ainsi les propriétés électroniques et optiques des nanomatériaux de ZnO. Elle offre une sensibilité accrue et des performances améliorées dans des environnements tels que les capteurs optiques et les appareils électroniques (Geoffrion, Guisbiers et al. 2020).

1.2.2 Propriétés chimiques

1.2.2.1 Réactivité Accrue:

La réactivité chimique des nanomatériaux de ZnO est accrue par leur petite taille et leur grande surface spécifique. Les photocatalyseurs sont particulièrement efficaces pour décomposer efficacement les polluants organiques sous irradiation UV (Taabouche 2015).

1.2.2.2 Propriétés Antimicrobiennes:

Des propriétés antibactériennes et antivirales significatives ont été démontrées par les nanomatériaux de ZnO. Ces nanomatériaux ont la capacité d'attaquer les membranes cellulaires des micro-organismes et sont ainsi utiles dans la désinfection de l'eau et des surfaces (Makvandi, Wang et al. 2020) , (Castro, Garcia et al. 2017).

1.2.3 Propriétés photocatalytiques

Les propriétés photocatalytiques de l'oxyde de zinc sont également présentes. En présence d'une excitation lumineuse, le ZnO accélère la réaction chimique en augmentant sensiblement sa vitesse de progression. Ainsi, le semi-conducteur cherchera à minéraliser l'ensemble du polluant organique par le biais des processus d'oxydation (Fenoll, Flores et al. 2012).

1.3 Méthodes de synthèse des nanomatériaux de ZnO

Les différentes méthodes de synthèse des nanomatériaux de ZnO présentent des avantages particuliers en ce qui concerne le contrôle de la granulométrie, de la morphologie et des caractéristiques chimiques. Les principales méthodes de synthèse utilisées pour produire des nanomatériaux de ZnO sont présentées ci-dessous.

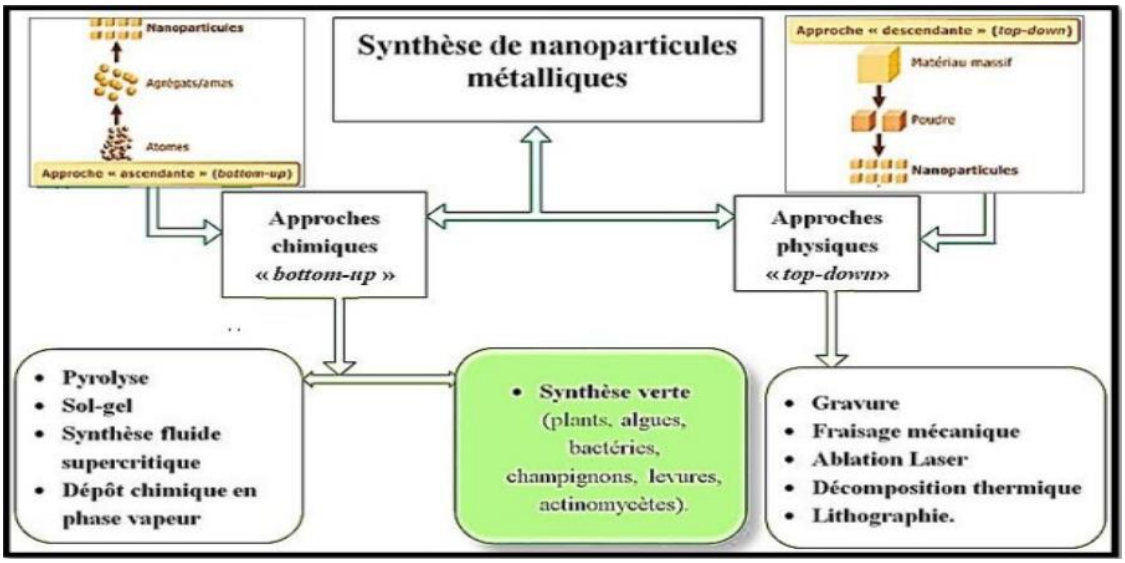


Figure 1-2 Schéma récapitulatif de synthèse de nanoparticules métalliques

1.3.1 Synthèse chimique

1.3.1.1 Méthode Sol-Gel

La synthèse sol-gel est une méthode communément employée pour la synthèse de nanomatériaux de ZnO. La formation d'un sol (suspension colloïdale) et la gélification sont nécessaires pour créer un réseau continu de particules. La taille et la morphologie des nanomatériaux peuvent être contrôlées avec précision grâce à cette méthode (Das and Srivasatava 2016) , (Patil, Bhaskar et al. 2021).

Un précurseur de Zn (comme l'acétate de zinc) est dissous dans un solvant, souvent l'eau ou l'alcool, et hydrolysé pour former un sol. Ensuite, la solution est transformée en gel par condensation, suivie par un séchage et une calcination pour obtenir des nanoparticules de ZnO. Facilité de mise en œuvre, possibilité de produire de grandes quantités, et contrôle précis des propriétés des nanoparticules .

1.3.1.2 Méthode Hydrothermale

La synthèse hydrothermale utilise des conditions de haute température et haute pression pour former des nanomatériaux de ZnO à partir de solutions aqueuses (Zhang, Nie et al. 2019). Une solution de précurseur de zinc est placée dans un autoclave et chauffée à une température élevée (généralement entre 100 et 200 °C) sous pression. Cette méthode favorise la croissance de cristaux bien définis et permet la synthèse de nanomatériaux avec une morphologie contrôlée. Production de nanoparticules de haute pureté avec des formes bien définies, et une bonne homogénéité des produits obtenus.

1.3.2 Synthèse physique

1.3.2.1 Dépôt en Phase Vapeur

Le dépôt en phase vapeur est une technique de synthèse physique où un précurseur gazeux se décompose et se dépose sur un substrat chauffé pour former une couche mince de ZnO. Les étapes typiques incluent :

- La vaporisation d'un précurseur chimique (comme le diéthyl zinc).
- La décomposition chimique du précurseur à haute température.
- La formation d'une couche mince de ZnO sur le substrat.

Cette méthode permet de produire des films minces de ZnO avec une grande uniformité et pureté (Faÿ 2003).

1.3.2.2 Ablation Laser

L'ablation laser est une technique physique où un laser pulsé est utilisé pour vaporiser un matériau cible (ZnO) dans un vide ou une atmosphère contrôlée, entraînant la formation de nanoparticules. Les avantages incluent la possibilité de produire des nanoparticules de haute pureté et de taille contrôlée. Les étapes typiques sont (Diouf 2012):

- La focalisation d'un laser pulsé sur une cible de ZnO.
- La vaporisation du matériau et la condensation des particules vaporisées.
- La collecte des nanoparticules sur un substrat ou dans un milieu liquide.

1.3.3 Synthèse biologique

1.3.3.1 Utilisation des Extraits de Plantes

La synthèse verte utilisant des extraits de plantes est une méthode écologique et durable pour produire des nanoparticules de ZnO. Les extraits de plantes contiennent des composés bioactifs qui peuvent réduire et stabiliser les ions zinc pour former des nanoparticules. Les étapes typiques incluent (Yuhelna, Isnaini et al. 2018):

- La préparation d'un extrait de plante par macération ou infusion.
- Le mélange de l'extrait de plante avec une solution anticipée de zinc.
- La formation de nanoparticules par réduction et stabilisation bioassistée.

Cette méthode est attrayante en raison de sa simplicité, de son coût réduit, et de son impact environnemental minimal.

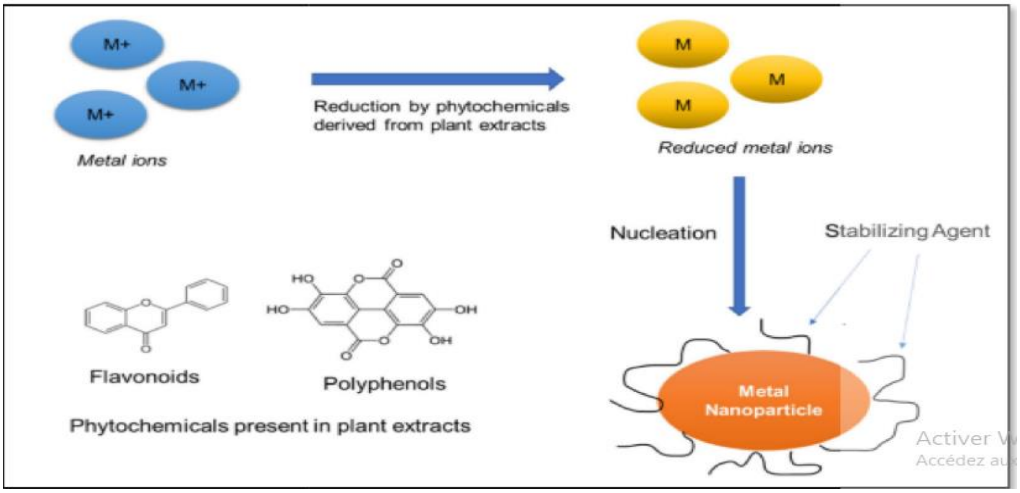


Figure 1-3 Mécanisme de formation des nanoparticules métallique dans un extrait de plantes

1.3.3.2 Utilisation des Microorganismes

Les micro-organismes, tels que les bactéries et les champignons, peuvent également être utilisés pour synthétiser des nanoparticules de ZnO. Les micro-organismes produisent des enzymes et d'autres biomolécules qui peuvent réduire les ions zinc pour former des nanoparticules. Les étapes typiques sont (Ghosh, Ahmad et al. 2021) :

- La culture de micro-organismes dans des conditions appropriées.

- L'ajout d'une solution de précurseur de zinc à la culture.
- La formation de nanoparticules de ZnO par les processus biologiques des micro-organismes.

Cette méthode est durable et peut être réalisée à température et pression ambiantes

1.4 Caractérisation des nanomatériaux de ZnO

Il est crucial de caractériser les nanomatériaux de ZnO afin de connaître leurs caractéristiques et d'améliorer leurs performances pour différents usages tels que le traitement des eaux usées. La morphologie, la structure, la taille, la distribution des particules et les propriétés de surface des nanomatériaux de ZnO peuvent être déterminées grâce aux techniques de caractérisation. Les principales techniques de caractérisation des nanomatériaux de ZnO sont les suivantes (Li and Lykotrafitis 2014) :

1.4.1 Microscopie électronique

1.4.1.1 Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage est une technique couramment utilisée pour observer la morphologie et la surface des nanoparticules de ZnO. Le MEB fournit des images haute résolution qui révèlent la forme, la taille et l'agencement des particules. Cette technique est essentielle pour analyser les caractéristiques morphologiques et pour vérifier la qualité des nanomatériaux synthétisés (Brouri 2011).

1.4.1.2 Microscopie Électronique en Transmission (TEM)

La microscopie électronique en transmission offre une résolution encore plus élevée que le SEM et permet d'observer les structures internes des nanoparticules de ZnO. Le TEM est utilisé pour déterminer la taille exacte des particules, l'épaisseur des couches et les défauts cristallins. Cette technique est particulièrement utile pour les nanoparticules de très petite taille (Ryzhikov, Jońca et al. 2015).

1.4.2 Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est une technique essentielle pour déterminer la structure cristalline des nanoparticules de ZnO. Elle permet d'identifier les phases cristallines présentes et d'évaluer la taille des cristallites à partir de l'élargissement des photos de diffraction. Le DRX fournit des informations sur la pureté et la structure cristalline des nanomatériaux (Hondow, Brown et al. 2015).

1.4.3 Spectroscopie

1.4.3.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est utilisée pour identifier les groupes fonctionnels présents à la surface des nanoparticules de ZnO. Cette technique permet de détecter les liaisons chimiques et de vérifier la présence de contaminants ou de ligands de surface après la synthèse des nanomatériaux (Charef and Lotfi).

1.4.3.2 Spectroscopie Raman

La spectroscopie Raman est une technique complémentaire à la FTIR qui fournit des informations sur les vibrations moléculaires et les structures cristallines des nanoparticules de ZnO. La spectroscopie Raman est particulièrement sensible aux phases cristallines et aux défauts dans les nanomatériaux (NAJJAR 2013).

1.4.3.3 Spectroscopie d'Absorption UV-Vis

La spectroscopie d'absorption UV-Vis est utilisée pour étudier les propriétés optiques des nanoparticules de ZnO. Cette technique permet de déterminer la bande interdite (band gap) et de comprendre les transitions électroniques dans les nanomatériaux. Les propriétés optiques des nanoparticules de ZnO sont cruciales pour leurs applications en photocatalyse et en capteurs (Chaiyat and Kaewmueang 2020).

1.4.3.4 Spectroscopie de Photoluminescence (PL)

La spectroscopie de photoluminescence (PL) est utilisée pour examiner les propriétés luminescentes des nanoparticules de ZnO. La PL fournit des informations sur les niveaux d'énergie et les défauts présents dans les nanomatériaux. Cette technique est particulièrement utile pour les applications optoélectroniques et les dispositifs à base de ZnO (Zhou, Zhao et al. 2007).

Chapitre2

Applications des Nanomatériaux de ZnO dans le traitement des eaux Usées

Chapitre 2
Applications des Nanomatériaux de ZnO dans le Traitement des Eaux Usées

2.1 Principes de base du traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées est essentiel pour éliminer les contaminants et les polluants des eaux usées et les rendre sûres pour leur réutilisation ou leur rejet dans l'environnement. Le traitement des eaux usées nécessite plusieurs processus physiques, chimiques et biologiques. Les étapes et les principes principaux du traitement des eaux usées sont présentés ci-dessous (Komtchou, Dirany et al. 2016).

2.1.1 Prétraitement

Le prétraitement vise à éliminer les gros débris et les solides en suspension qui peuvent endommager l'équipement de traitement ou entraîner les processus ultérieurement. Les principales étapes de prétraitement comprennent (Combe 1973):

- **Tamisage** : Utilisation de grilles ou de tamis pour retirer les gros objets comme les bâtons, les pierres et les plastiques.
- **Dégraissage** : Séparation des huiles et des graisses légères qui flottent à la surface des eaux usées.
- **Dessablage** : Élimination du sable, du gravier et d'autres particules lourdes qui se déposent au fond des bassins de dessablage.

2.1.2 Traitement Primaire

Le traitement primaire consiste à éliminer les solides en suspension et une partie de la matière organique dissoute des eaux usées. Les étapes typiques incluent :

- **Décantation** : Les eaux usées sont envoyées dans des bassins de décantation où les solides lourds se déposent au fond sous forme de boues, tandis que les matières flottantes sont éliminées de la surface (Jeddi, Boussalwa et al. 2015).
- **Flottation** : Utilisation de bulles d'air pour faire remonter les particules légères à la surface, où elles peuvent être retirées et retirées (MOULIN, RECHELS et al. 2013).

2.1.3 Traitement Secondaire

Le traitement secondaire est un processus biologique visant à dégrader la matière organique dissoute et en suspension dans les eaux usées. Les principales techniques utilisées sont (MOULIN, RECHELS et al. 2013):

- **Boues activées** : Utilisation de microorganismes dans des bassins d'aération pour dégrader la matière organique. Les micro-organismes forment des flocs qui peuvent être séparés des eaux traitées par décantation.
- **Filtres biologiques** : Les eaux usées sont percolées à travers un lit de matériaux support colonisé par des micro-organismes qui décomposent la matière organique.
- **Réacteurs biologiques séquentiels (SBR)** : Alternance de phases d'aération et de décantation dans un même bassin pour traiter les eaux usées .

2.1.4 Traitement Tertiaire

Le traitement tertiaire est une étape avancée visant à éliminer les contaminants résiduels et à améliorer la qualité de l'eau traitée (Van Coillie, De La Noue et al. 1990) , Les techniques utilisées incluent (YANG, MONNOT et al.) :

- **Filtration** : Passage des eaux traitées à travers des filtres à sable, à charbon actif ou à membranes pour éliminer les particules fines.
- **Désinfection** : Utilisation de produits chimiques (chlore, ozone) ou de rayonnement UV pour tuer les microorganismes pathogènes.
- **Élimination des nutriments** : Techniques spécifiques pour retirer les nutriments comme l'azote et le phosphore qui peuvent provoquer l'eutrophisation des plans d'eau.

2.1.5 Traitement des Boues

Les boues produites durant les différentes étapes de traitement doivent également être traitées avant leur élimination ou réutilisation. Les principales étapes de traitement des boues incluent (BERLAND 2014) :

- **Épaississement** : Réduction du volume des boues en éliminant l'eau.
- **Stabilisation** : Réduction de la matière organique et des pathogènes dans les boues par digestion anaérobie ou aérobie.
- **Déshydratation** : Élimination de l'eau restante pour produire des boues solides utilisables en agriculture ou en incinération.

le traitement des eaux usées repose sur une série d'étapes qui visent à éliminer efficacement les contaminants et à produire une eau traitée de qualité adéquate pour une réutilisation ou un rejet sécurisé dans l'environnement.

Les propriétés uniques des nanomatériaux de ZnO permettent de jouer un rôle important dans les processus de traitement avancés, en particulier pour la dégradation des polluants organiques et la désinfection.

2.2 Utilisation des nanomatériaux de ZnO pour la dégradation des polluants organiques

En raison de leurs propriétés uniques, les nanomatériaux de ZnO sont devenus des candidats prometteurs pour la dégradation des polluants organiques. En tant que catalyseurs ou photocatalyseurs, ces matériaux sont capables de dégrader les composés organiques en produits moins toxiques sous l'action de la lumière solaire ou d'une lumière artificielle.
La photocatalyse repose sur la capacité du ZnO à produire des paires électron-trou en réaction à l'absorption de photons (Bouaifel 2012).

La surface spécifique élevée et riche en sites actifs des nanomatériaux de ZnO facilite l'adsorption des polluants organiques. Après absorption, ces contaminants subissent les processus de dégradation déclenchés par les électrons et les trous créés par le ZnO par la lumière. Ces réactions peuvent entraîner la rupture des liens chimiques des contaminants, les rendant moins toxiques (dioxyde de carbone, eau, ions minéraux) (Ali, Dakkach et al. 2014).

La dégradation est efficace selon différents paramètres tels que la taille, la forme et la structure cristalline des nanomatériaux de ZnO, la concentration des polluants organiques, le pH de la solution et l'intensité lumineuse. La surface modifiée des nanomatériaux de ZnO par des dopants ou des co-catalyseurs a permis d'améliorer significativement leurs performances photocatalytiques en augmentant la séparation des paires électron-trou ou en élargissant le spectre d'absorption (MEDJILI 2024).

Les nanoparticules de ZnO (ZnO – NPs) sont potentiellement prometteurs pour dégrader les polluants organiques dans le secteur de la dépollution de l'eau et de l'air. Il est nécessaire d'effectuer des recherches supplémentaires pour améliorer les conditions de fonctionnement et comprendre les mécanismes sous-jacents afin de garantir une efficacité maximale et une application pratique à grande échelle (Miyashiro 2021).

2.3 Applications dans la désinfection des eaux usées

Le dioxyde de zinc (ZnO) est un matériau semi-conducteur largement étudié pour ses propriétés photocatalytiques, notamment dans le cadre de la désinfection des eaux usées .

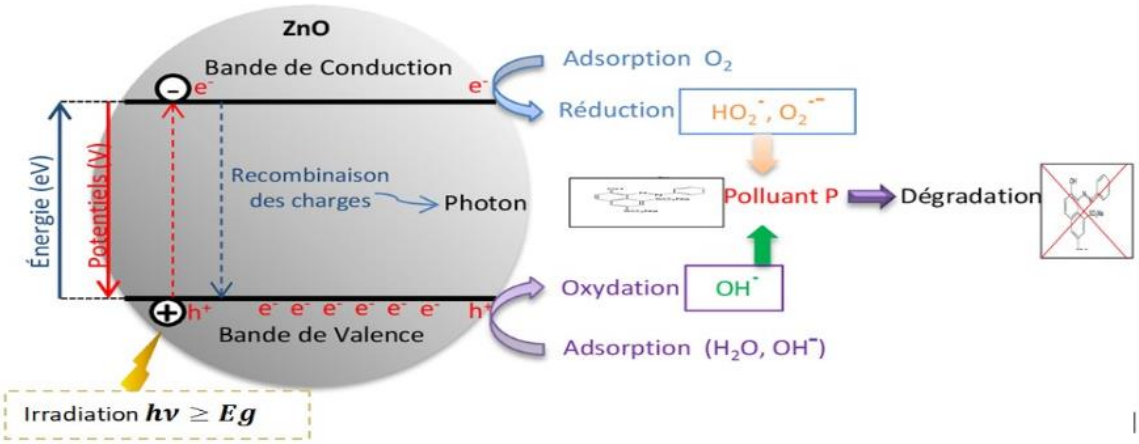
2.3.1 Mécanisme de désinfection

Le ZnO est un matériau semi-conducteur qui possède une large bande interdite d'environ 3,37 eV, ce qui le rend particulièrement efficace pour l'absorption des rayons UV. Lorsqu'il est irradié par une lumière UV, le ZnO génère des paires électron-trou (e^-/h^+) (Sobczyński and Dobosz 2001).

$$ZnO + hv \rightarrow e^- + h^+$$

Ces porteurs de charge peuvent participer à des réactions redox qui génèrent des radicaux libres, tels que les radicaux hydroxyles (°OH) et les radicaux superoxydes ($O_2^{\bullet -}$), extrêmement réactifs et capables de dégrader une large gamme de polluants organiques présents dans les eaux usées (Ong, Ng et al. 2018).

$$h^+ + H_2O \rightarrow {}^\circ OH + H^+$$



$$e^- + O_2 \rightarrow O_2^{\circ -}$$

Figure 2-1 Principe de photocatalyse hétérogène de ZnO

2.3.2 Propriétés antibactériennes

L'activité antibactérienne du dioxyde de zinc (ZnO) a été largement étudiée et documentée. Les nanoparticules de ZnO (ZnO-NPs) sont particulièrement efficaces pour inhiber la croissance bactérienne (Paganini, Dalmasso et al. 2016).

2.3.2.1 Production de radicaux libres

Sous irradiation UV, le ZnO génère des paires électron-trou (e^-/h^+) qui réagissent avec l'eau et l'oxygène pour former des radicaux libres. Ces radicaux sont hautement réactifs et peuvent endommager les membranes cellulaires, les protéines, et l'ADN des bactéries, conduisant à leur mort.

2.3.2.2 Libération d'ions Zn^{2+}

Les ions Zn^{2+} peuvent se dissoudre partiellement dans l'eau et interagir directement avec les cellules bactériennes. Les ions Zn^{2+} peuvent pénétrer les membranes cellulaires et perturber les fonctions enzymatiques et la structure des protéines, entraînant la mort cellulaire.

2.3.2.3 Interaction avec la membrane cellulaire

Les nanoparticules de ZnO peuvent adhérer à la surface des cellules bactériennes, causant des dommages mécaniques aux membranes cellulaires. Cette adhésion peut entraîner la lyse cellulaire et la libération de composants intracellulaires.

2.3.2.4 Stress oxydatif

Les radicaux libres générés provoquent un stress oxydatif important à l'intérieur des cellules bactériennes. Le stress oxydatif peut dénaturer les protéines, endommager les lipides membranaires, et fragmenter l'ADN, ce qui est souvent létal pour les bactéries.

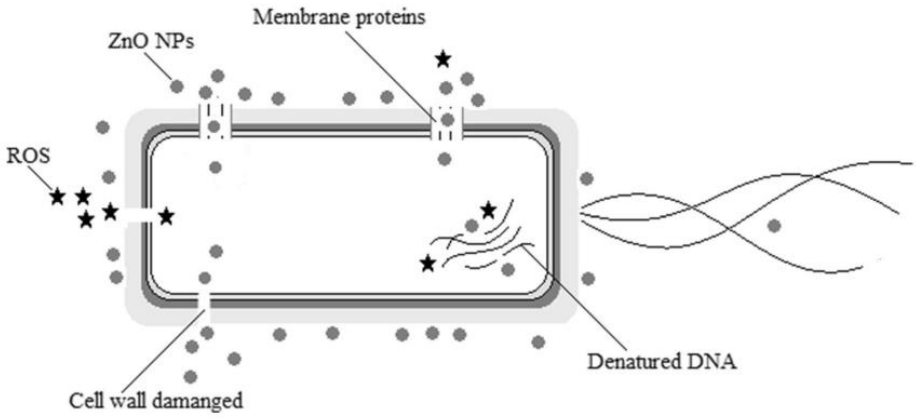


Figure 2-2 Modèle cellulaire pour le mécanisme principal de l'action bactéricide des NPs de ZnO.

2.3.3 Propriétés antivirales

Les nanoparticules de ZnO (ZnO-NPs) peuvent interagir avec les virus de diverses manières, ce qui les rend potentiellement efficaces contre un large éventail de virus (Paganini, Dalmasso et al. 2016) , (Poyatos, Muñio et al. 2010).

2.3.3.1 Interaction directe avec le virus

Les nanoparticules de ZnO peuvent se lier directement aux particules virales, empêchant leur attachement et leur entrée dans les cellules hôtes. Cette interaction peut altérer la structure virale, rendant le virus non infectieux et provoquant des dommages physiques à la capside virale

(l'enveloppe protéique) ou à l'enveloppe lipidique des virus enveloppés, entraînant une perte de viabilité du virus.

2.3.3.2 Effets immunomodulateurs

Le ZnO peut également influencer la réponse immunitaire de l'hôte. Des études ont montré que le zinc joue un rôle crucial dans le système immunitaire, aidant à la production de cytokines et à la modulation de l'activité des cellules immunitaires, ce qui peut aider à combattre les infections virales.

2.3.3.3 Interférence avec la réplication virale

Les ions Zn^{2+} libérés par les nanoparticules de ZnO peuvent inhiber l'activité enzymatique virale essentielle à la réplication du virus. Par exemple, ils peuvent interférer avec les polymérases virales ou d'autres enzymes nécessaires à la synthèse d'ARN ou d'ADN viral.

2.3.3.4 Stress oxydatif

Tout comme pour les bactéries, les ZnO-NPs peuvent générer des radicaux libres sous irradiation UV. Ces radicaux peuvent oxyder les composants viraux, tels que les protéines et les acides nucléiques, perturbant ainsi le cycle de réplication du virus et inhibant son infectiosité.

Chapitre 3

Optimisation des nanomateriaux de ZnO pour le traitement des eaux usées

Chapitre 3

Optimisation des Nanomatériaux de ZnO pour le Traitement des Eaux Usées

3.1 Facteurs influençant l'efficacité des nanomatériaux de ZnO

Les nanomatériaux de ZnO présentent des perspectives d'utilisation en désinfection, ainsi que des propriétés antivirales et antibactériennes. Cependant, leur performance peut dépendre de divers facteurs, tels que leurs caractéristiques propres ou leurs conditions environnementales. (Achouri 2016).

3.1.1 Propriétés Physico-chimiques des ZnO-NPs

3.1.1.1 Taille des particules

Les nanoparticules plus petites ont une surface spécifique plus grande, ce qui augmente le nombre de sites actifs disponibles pour interagir avec les microorganismes et les composés organiques.

À l'échelle nanométrique, les propriétés électroniques des matériaux peuvent être modifiées, ce qui peut augmenter leur activité photocatalytique. (Mutalib and Jaafar 2022).

3.1.1.2 Forme des Particules

Les nanoparticules (sphériques, cylindriques, tiges, etc.) peuvent avoir une influence sur l'interaction avec les microorganismes et les polluants. Les nanofils ou les nanorods peuvent être utilisés afin d'améliorer la surface de contact.

Les particules ayant un rapport d'aspect élevé peuvent présenter des propriétés optiques et électroniques différentes, ce qui peut avoir un impact sur leur efficacité photocatalytique et antimicrobienne (Rajesh 2016).

3.1.1.3 Cristallinité et Structure

Les phases cristallines (wurtzite, sphalérite, etc.) peuvent influencer les propriétés du ZnO. La structure wurtzite est la plus courante et la plus active photocatalytiquement, des défauts

de la structure cristalline permettant d'accroître l'activité en fournissant des sites supplémentaires de production de radicaux libres (Le Pivert 2020).

3.1.1.4 Surface et Fonctionnalisation

Différents agents chimiques peuvent augmenter la dispersion, la stabilité et l'interaction spécifique des ZnO-NPs avec les microorganismes et les polluants. Certains types de cellules ou de composés peuvent être plus attirés par l'incorporation de groupes fonctionnels spécifiques sur la surface des nanoparticules (Sonohara, Muramatsu et al. 1995).

3.1.2 Conditions Environnementales

3.1.2.1 pH du Milieu

Le pH peut avoir un impact sur la dissolution des nanoparticules de ZnO et la libération des ions Zn^{2+}, jouant un rôle crucial dans l'activité antimicrobienne et antivirale. Un pH moindre peut faciliter la dissolution et améliorer l'efficacité.

La stabilité des nanoparticules peut être altérée par des conditions de pH extrêmes, ce qui peut entraîner leur agglomération ou leur dissolution totale. (Rosset 2017).

3.1.2.2 Présence de Lumière (UV/Visible)

L'activation des capacités photocatalytiques du ZnO dépend de la lumière UV, qui produit des paires électron-trou de radicaux libres.

L'efficacité sous lumière visible peut être limitée si le dopage comporte d'autres éléments, mais l'absorption peut être étendue dans le spectre visible (Hariharan 2006).

3.1.2.3 Concentration des Nanoparticules

En augmentant la production de radicaux libres et la libération d'ions Zn^{2+}, une concentration plus élevée de ZnO-NPs peut améliorer l'efficacité antimicrobienne et antivirale. Cependant, des concentrations excessives peuvent avoir des effets toxiques sur les cellules non ciblées et l'environnement (Rosset 2017).

3.2 Techniques d'amélioration des performances

La modification des propriétés intrinsèques des nanoparticules, l'optimisation des conditions environnementales et l'utilisation de techniques de synthèse avancées sont nécessaires pour améliorer les performances des nanomatériaux de ZnO. Ces stratégies combinées permettent d'améliorer l'efficacité des ZnO-NPs dans différents domaines d'application en optimisant leur

activité photocatalytique, antimicrobienne et antivirale et en réduisant les effets secondaires potentiels. (Marwa 2020) , (Amara 2020).

3.2.1 Dopage

3.2.1.1 Dopage Métallique

La dopage avec des métaux de transition peut augmenter l'activité photocatalytique du ZnO en modifiant les propriétés électroniques et en réduisant la recombinaison des paires électron-trou. Il est également possible d'étendre l'absorption du ZnO dans le spectre visible, améliorant ainsi son efficacité sous lumière naturelle (Zaleska 2008).

3.2.1.2 Dopage Non-Métallique

Les composés non métalliques peuvent altérer la bande interdite du ZnO et ainsi améliorer ses capacités photocatalytiques visibles. Les propriétés de surface peuvent également être améliorées grâce à ces dopants qui augmentent la réactivité et l'affinité des microorganismes et des polluants (Wu, Chao et al. 2004).

3.2.2 Modification de la Surface

3.2.2.1 Fonctionnalisation Chimique

L'ajout de groupes fonctionnels tels que des amines, des carboxyles ou des thiols peut améliorer l'affinité des ZnO-NPs pour les cellules cibles, augmentant leur efficacité antimicrobienne et antivirale et L'enrobage des ZnO-NPs avec des polymères ou des agents de surface peut améliorer leur dispersion dans les milieux aqueux et prévenir l'agglomération, augmentant ainsi leur surface active (Bhardwaj, Sharma et al. 2020).

3.2.2.2 Composites et Hybrides

La combinaison de ZnO avec d'autres matériaux (comme le graphie, le TiO_2, ou le SiO_2) peut améliorer les propriétés photocatalytiques et antimicrobiennes en créant des synergies entre les matériaux. La formation de nanostructures hybrides avec des matériaux organiques ou inorganiques peut augmenter l'activité de surface et la stabilité des ZnO-NPs (Khan, Saeed et al. 2019).

3.2.3 Optimisation des conditions opératoires

3.2.3.1 Conditions de pH et de Température

Ajuster le pH du milieu pour optimiser la dissolution des ions Zn^{2+} et la production de radicaux libres, maximisant ainsi l'efficacité antimicrobienne.

La température peut influencer la cinétique des réactions photocatalytiques et la solubilité des ions Zn^{2+}, affectant ainsi l'efficacité globale (Kamaraj, Srinivasan et al. 2020).

3.2.3.2 Présence de Catalyseurs

L'utilisation de co-catalyseurs tels que l'argent (Ag) ou l'or (Au) peut augmenter l'activité photocatalytique en facilitant le transfert de charges et en réduisant la recombinaison des paires électron-trou.

Les effets plasmatiques peuvent être provoqués par des nanoparticules de métaux nobles qui augmentent l'absorption lumineuse et l'efficacité sous lumière visible (Heath 1998).

3.3 Impact environnemental et durabilité

Pour optimiser l'utilisation du ZnO dans le traitement des eaux usées, il est nécessaire de considérer non seulement sa capacité à dégrader les contaminants, mais également son impact sur l'environnement et sa durabilité.

3.3.1 Impact Environnemental

- Le ZnO est reconnu pour son efficience dans la désinfection et la dégradation des contaminants organiques. Néanmoins, son empreinte écologique est liée à sa biodégradabilité et à sa toxicité pour les organismes aquatiques. Les nanoparticules de ZnO peuvent s'accumuler dans les écosystèmes, mettant en danger la faune et la flore aquatique.
- En se dégradant, le ZnO peut libérer des ions zinc qui, à des concentrations élevées, peuvent être toxiques pour les organismes aquatiques. Il est crucial de surveiller ces niveaux pour éviter toute contamination secondaire.
- Les résidus peuvent être générés par l'utilisation de ZnO dans le traitement des eaux usées, ce qui nécessite une gestion appropriée pour éviter une pollution supplémentaire. (Daher 2023) , (Imyim 2000)**.**

3.3.2 Durabilité

- Des techniques de récupération et de réutilisation des nanoparticules après le traitement peuvent être utilisées pour optimiser le ZnO, réduisant ainsi les déchets et les coûts à long terme.
- Performance Énergétique : L'efficacité énergétique des procédés de traitement à base de ZnO doit être évaluée. Il est préférable d'utiliser des technologies à faible consommation d'énergie pour assurer une durabilité écologique et économique.
- La combinaison du ZnO avec d'autres méthodes de traitement (comme les ultrasons, les UV ou les micro-ondes) peut améliorer l'efficacité du traitement, réduisant ainsi la quantité de ZnO nécessaire et minimisant les impacts environnementaux. (Baillard 2023).

3.4 Innovations futures et tendances de recherche

Il est nécessaire de combiner la chimie des matériaux, l'ingénierie des procédés et les sciences environnementales pour optimiser le ZnO dans le traitement des eaux usées. Le ZnO est une solution durable et efficace pour le traitement des eaux usées grâce aux innovations futures et aux tendances de recherche (Chaudhary, Bhusari et al. 2019) , (Raghunath and Perumal 2017).

- Nanostructuration du ZnO : La surface spécifique et la réactivité sont améliorées grâce à la mise au point de nanostructures (nanotubes, nanofils, nanosphères) afin de mieux interagir avec les polluants.

- Le dopage du ZnO avec des éléments tels que l'argent (Ag), le cuivre (Cu) ou le fer (Fe) améliore ses propriétés photocatalytiques et antimicrobiennes. Les composites contenant d'autres matériaux tels que le graphène ou les polymères accroissent la stabilité et l'efficacité du ZnO.
- Méthodes de Synthèse : Des techniques de synthèse plus régulières, telles que la chimie de sol-gel, l'hydrothermale et la pyrolyse, permettent de fabriquer des nanostructures de ZnO aux propriétés améliorées.
- Utilisation des propriétés photocatalytiques de ZnO sous irradiation UV ou visible pour la dégradation des polluants organiques et des microorganismes pathogènes dans les eaux usées. L'incorporation de ZnO dans de nouveaux systèmes de photoréacteurs est aussi une voie à suivre.
- La combinaison de ZnO avec d'autres techniques de traitement telles que l'oxydation avancée, les ultrasons ou les micro-ondes pourrait offrir des solutions synergiques pour une dégradation plus complète des contaminants.
- Applications en Milieux Réels : La transition des essais en laboratoire vers les applications en milieu réel (station d'épuration, système de traitement des lixiviats) est essentielle pour évaluer la viabilité et l'efficacité du ZnO dans des situations concrètes.

Conclusion générale

En raison de la croissance démographique, de l'industrialisation rapide et de l'augmentation des activités agricoles, la gestion durable des ressources en eau est un défi majeur de notre époque. Les nanotechnologies, en particulier les nanomatériaux d'oxyde de zinc (ZnO), offrent des solutions prometteuses pour le traitement des eaux usées, permettant ainsi de répondre efficacement aux besoins environnementaux et sanitaires.

Les principales caractéristiques des nanomatériaux de ZnO ont été étudiées dans ce mémoire, notamment leurs caractéristiques, leurs procédés de synthèse et de caractérisation, leur utilisation dans le traitement des eaux usées et les moyens d'améliorer leurs performances.

Dans le premier chapitre, nous avons décrit en détail les propriétés physiques, chimiques et optiques des nanomatériaux de ZnO, en abordant leur activité photocatalytique, leur stabilité chimique et leurs propriétés antibactériennes. Les différentes techniques de synthèse, telles que la précipitation, le sol-gel et l'hydrothermale, ont été examinées, mettant en lumière leurs avantages et leurs limites respectifs. La spectroscopie, la microscopie électronique et la diffraction des rayons X ont également été discutées afin de mieux comprendre les structures et les propriétés des nanoparticules de ZnO.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différentes utilisations des nanomatériaux de ZnO pour le traitement des eaux usées. Nous avons étudié comment les nanomatériaux peuvent dégrader efficacement les polluants organiques par photocatalyse, désinfecter les agents pathogènes grâce à leurs propriétés antibactériennes et adsorber les métaux lourds, offrant ainsi une solution polyvalente et efficace pour l'assainissement des eaux. L'efficacité des nanomatériaux de ZnO dans divers contextes de traitement des eaux usées a été démontrée à travers des études cas et des expériences pratiques.

Le chapitre 3 présente les diverses approches d'amélioration des nanomatériaux de ZnO afin d'en tirer le meilleur parti possible. Les techniques de modification de surface, de dopage avec d'autres éléments et de nanocomposites ont été étudiées pour améliorer l'activité photocatalytique, la stabilité et la réutilisabilité des nanoparticules de ZnO. Les difficultés actuelles, comme

l'agglomération des particules et la récupération des nanomatériaux après utilisation, ont été abordées, ainsi que les perspectives d'avenir pour les surmonter.

Les nanomatériaux de ZnO représentent une avancée importante dans le traitement des eaux usées en raison de leurs propriétés exceptionnelles et de leur polyvalence. Néanmoins, pour optimiser leur potentiel, il est essentiel de mettre au point des méthodes de synthèse plus efficaces, des techniques de modification de surface et des stratégies d'optimisation. Les nanomatériaux de ZnO devraient être évalués à long terme pour assurer leur utilisation sûre et durable dans les recherches futures.

En mettant en lumière les possibilités offertes par les nanomatériaux de ZnO pour une gestion plus durable et efficace des ressources en eau, ce mémoire contribue à l'avancée des connaissances dans le domaine des nanotechnologies environnementales. Les solutions innovantes, durables et respectueuses de l'environnement pour le traitement des eaux usées, qui répondent aux défis mondiaux actuels et futurs, sont possibles grâce aux innovations et stratégies présentées ici.

Bibliographie

Achouri, F. (2016). Détoxification des eaux usées urbaines par photocatalyse solaire, Université de Lorraine.

Ali, L. B., et al. (2014). "Dégradation photochimique du colorant alizarine par des nanomatériaux à base de TiO2 ou ZnO tous seuls ou modifiés avec le Pr3+ préparés en milieu polyol (Photochemical degradation of alizarin dye using nanomaterials based on TiO2 or ZnO alone or modified,(2014)." **5**: 2113-2121.

Amara, N. (2020). Revêtements nano-composites nanofils de ZnO/nanoparticules destinés à l'éclairage à LEDs et à la photocatalyse, Université Clermont Auvergne [2017-2020]; University of Sfax.

Baillard, A. (2023). Nanofils de ZnO pour la dépollution de l'eau par photocatalyse, Université Grenoble Alpes.

Begum, S., et al. (2020). Nanomaterials. Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. S. Hashmi and I. A. Choudhury. Oxford, Elsevier**:** 515-539..

BERLAND, J.-M. (2014). "Traitement des boues d'épuration."

Bhardwaj, A., et al. (2020). "Nanotechnology applications and synthesis of graphene as nanomaterial for nanoelectronics." 251-269.

Bouaifel, F. (2012). Détection d'interactions moléculaires par LSPR et utilisation de surfaces semi-conductrices pour la dégradation photocatalytique de polluants organiques sous irradiation visible, Lille 1.

Brouri, T. (2011). Élaboration et étude des propriétés électriques des couches minces et des nanofils de ZnO, Université Paris-Est.

Castro, E., et al. (2017). "Fullerenes in biology and medicine." **5**(32): 6523-6535.

Chaiyat, N. and C. Kaewmueang (2020). "Thermal Performance of Small Incinerator for Combined Heat and Power by Organic Rankine Cycle." **13**: 12-25.

Charef, M. M. and M. B. Lotfi "Synthèse biologique des nanoparticules."

Chaudhary, R. G., et al. (2019). "Metal/metal oxide nanoparticles: toxicity, applications, and future prospects." **25**(37): 4013-4029.

Combe, P.-M. J. R. é. (1973). "Muller (WJ)-Réutilisation des eaux usées en Allemagne." **24**(4): 706-706.

Daher, E. (2023). Conception de nouvelles nanostructures de ZnO pour une dégradation photocatalytique améliorée des polluants organiques, Sorbonne université.

Das, S. and V. C. J. S. S. Srivasatava (2016). "Synthesis and characterization of ZnO–MgO nanocomposite by co-precipitation method." **4**(4): 190-195.

Diouf, M. (2012). Synthèse de nanoparticules par ablation laser en liquide et étude de leurs propriétés optiques, Université Claude Bernard-Lyon I.

Faÿ, S. (2003). L'oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires, EPFL.

Fenoll, J., et al. (2012). "Photodegradation of eight miscellaneous pesticides in drinking water after treatment with semiconductor materials under sunlight at pilot plant scale." **204**: 54-64.

Geoffrion, L. D., et al. (2020). "Quantum confinement: size on the grill!" **140**: 109320.

Ghosh, S., et al. (2021). "Microbial nano-factories: synthesis and biomedical applications." **9**: 626834.

Hariharan, C. J. A. C. A. G. (2006). "Photocatalytic degradation of organic contaminants in water by ZnO nanoparticles: Revisited." **304**: 55-61.

Heath, J. R. J. C. S. R. (1998). "Covalency in semiconductor quantum dots." **27**(1): 65-71.

Hondow, N., et al. (2015). Chapter 6 - Nanomaterials: Dispersion, Dissolution and Dose. Frontiers of Nanoscience. M. Baalousha and J. R. Lead, Elsevier. **8:** 183-216.

Imyim, A. J. D. T. o. t. N. I. o. t. A. S. o. L. (2000). "Méthodologie d'évaluation environnementale des déchets stabilisés/solidifiés par liants hydrauliques."

Jeddi, F., et al. (2015). "Analyses physico-chimique et biologique des eaux usées rejetées par la société SURAC dar Gueddari (Maroc)." **13**(2): 274.

Kamaraj, M., et al. (2020). "Facile development of sunlit ZnO nanoparticles-activated carbon hybrid from pernicious weed as an operative nano-adsorbent for removal of methylene blue and chromium from aqueous solution: extended application in tannery industrial wastewater." **17**: 100540.

Khan, I., et al. (2019). "Nanoparticles: Properties, applications and toxicities." **12**(7): 908-931.

Komtchou, S., et al. (2016). "Application des procédés d'oxydation avancée pour le traitement des eaux contaminées par les pesticides – revue de littérature." Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science **29**(3): 231-262.

Le Pivert, M. (2020). Nanostructures de ZnO pour le développement de routes dépolluantes photocatalytiques, Université Paris-Est.

Li, H. and G. Lykotrafitis (2014). "Erythrocyte membrane model with explicit description of the lipid bilayer and the spectrin network." Biophys J **107**(3): 642-653.

Makvandi, P., et al. (2020). "Metal-based nanomaterials in biomedical applications: antimicrobial activity and cytotoxicity aspects." **30**(22): 1910021.

Marwa, B. (2020). "Amélioration de la performance épuratoire des systèmes de traitement des eaux usées par filtres plantés de macrophytes et contrôle de la qualité microbiologique des eaux traitées."

MEDJILI, C. (2024). Synthèse et caractérisation des nanocomposites à base de polymères conducteurs et des métaux de transition pour la dégradation des polluants organiques, Ecole Nationale Supérieure de Biotechnologie.

Miyashiro, C. S. (2021). "Développement de catalyseurs hétérogènes pour la photodégradation du néonicotinoïde acétamipride dans l'eau."

MOULIN, S., et al. (2013). "Traitement des eaux usées."

Mutalib, A. A. and N. J. T. E. R. T. Jaafar (2022). "ZnO photocatalysts applications in abating the organic pollutant contamination: A mini review." **3**: 100013.

Muthukumar, P., et al. (2013). "Structural and optical properties of zno nano particles grown on copper substrate by electrodeposition method." **8**(4).

NAJJAR, S. (2013). Couplage AFM/Raman et spectroscopie Raman exaltée, Université Bordeaux 1.

Ong, C. B., et al. (2018). "A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mechanisms and applications." **81**: 536-551.

Paganini, M. C., et al. (2016). "Beyond TiO2: Cerium-Doped Zinc Oxide as a New Photocatalyst for the Photodegradation of Persistent Pollutants." **1**(12): 3377-3383.

Patil, N., et al. (2021). "Overview on methods of synthesis of nanoparticles." **13**(2): 11-16.

Poyatos, J. M., et al. (2010). "Advanced oxidation processes for wastewater treatment: state of the art." **205**: 187-204.

Raghunath, A. and E. J. I. j. o. a. a. Perumal (2017). "Metal oxide nanoparticles as antimicrobial agents: a promise for the future." **49**(2): 137-152.

Rajesh, S. J. J. N. (2016). "Sagar Reddy Yadav L, Thyagarajan K. Structural, optical, thermal and Photocatalytic properties of ZnO nanoparticles of Betel Leave by using Green synthesis method." **6**(3): 250-255.

Rosset, A. (2017). Synthèse et caractérisation de nanoparticules catalytiques pour une application en photocatalyse solaire, Université de Perpignan.

Ryzhikov, A., et al. (2015). "Organometallic synthesis of ZnO nanoparticles for gas sensing: Towards selectivity through nanoparticles morphology." **17**: 1-10.

Sobczyński, A. and A. J. P. j. o. e. s. Dobosz (2001). "Water purification by photocatalysis on semiconductors." **10**(4): 195-205.

Sonohara, R., et al. (1995). "Difference in surface properties between Escherichia coli and Staphylococcus aureus as revealed by electrophoretic mobility measurements." **55**(3): 273-277.

Taabouche, A. (2015). Etude structurale et optique de films minces ZnO élaborés par voie physique et/ou chimique, Université de Constantine 1.

Tomar, R., et al. (2020). "Photocatalytic degradation of dyes by nanomaterials." **29**: 967-973.

Van Coillie, R., et al. (1990). "Traitement tertiaire d'eaux usées municipales par culture de Scenedesmus sp. en installation pilote." **3**(4): 441-455.

Wu, C.-G., et al. (2004). "Enhancement of the photo catalytic performance of TiO2 catalysts via transition metal modification." **97**(2-3): 103-112.

YANG, J., et al. "Traitement tertiaire d'eaux usées urbaines pour la réutilisation par ultrafiltration."

Yuhelna, Y., et al. (2018). "TANTANGAN GERAKAN PEREMPUAN BERBASIS KOMUNITAS LOKAL." Kafa`ah Journal of Gender Studies **8**: 131.

Zaleska, A. J. R. p. o. e. (2008). "Doped-TiO2: a review." **2**(3): 157-164.

Zhang, J., et al. (2019). "Selectively activated PRP exerts differential effects on tendon stem/progenitor cells and tendon healing." J Tissue Eng **10**: 2041731418820034.

Zhou, J., et al. (2007). "Size-controlled synthesis of ZnO nanoparticles and their photoluminescence properties." **122**: 195-197.